

MP38 - Régimes transitoires

Table des matières

Introduction	2
1 Régimes transitoires en électronique	2
1.1 Circuit RC	2
1.2 Application : détecteur d'enveloppe	3
1.3 Circuit RLC	4
1.4 Slew-rate de l'AO	6
2 Régimes transitoires dans d'autres domaines de la physique	7
2.1 Photorésistance	7
2.2 Conduction thermique	8
Conclusion	9
Remarques diverses	10

Bibliographie¹

- Duffait CAPES
- Duffait Elec.
- Sextant
- Quaranta (T.II, Thermo)
- Donnini (T.IV, Électricité)
- Vauchelles (contient des infos pour le circuit RC, RLC, le slew-rate, la photorésistance)

¹La bibliographie est reprise à la fin du document avec les références complètes pour chaque ouvrage.

Introduction

Le régime transitoire correspond à l'évolution d'un système d'un état initial vers un état final (permanent ou d'équilibre) provoquée par un changement des contraintes.

Tout système est caractérisé par la constante de temps τ de son régime transitoire.

Les régimes transitoires se rencontrent dans tous les domaines de la physique. On va tout d'abord les étudier sur des montages en électronique pour lesquels les mesures sont plus aisées ; on verra ensuite des exemples de régimes transitoires dans d'autres domaines de la physique.

1 Régimes transitoires en électronique

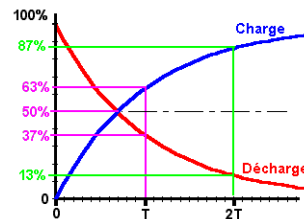
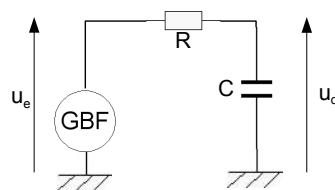
1.1 Circuit RC ([Duffait, CAPES], p.68)

Système du 1^{er} ordre :

$$\frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{RC} = \frac{u_e}{RC}$$

Le temps caractéristique du système est : $\tau = RC$.

La charge du condensateur sous une tension constante E s'écrit : $u_c(t) = E(1 - e^{-t/\tau})$.



On utilise une boîte à décades pour la résistance et une boîte à décades pour le condensateur afin de pouvoir les faire varier facilement.

On envoie un signal crête à crête de fréquence f suffisamment faible devant $1/\tau \approx 20$ kHz pour bien observer la charge et la décharge du condensateur, par exemple $f = 2$ kHz.

$$R = 10.0 \pm 0.1 \text{ k}\Omega$$

$$C = 4.7 \pm 0.1 \text{ nF}$$

$$\tau = 47.0 \pm 1.4 \text{ }\mu\text{s}$$

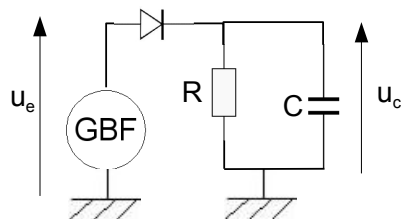
On a choisi une valeur de résistance assez élevée afin de pouvoir s'affranchir de la résistance de sortie du générateur ($\approx 50 \Omega$).

On mesure τ à l'oscilloscope en mesurant le temps que met la tension aux bornes du condensateur à atteindre 63 % de sa valeur finale : $\tau_{\text{mes}} = 46 \pm 1 \text{ }\mu\text{s}$.

On vérifie la linéarité de τ en fonction de C . En effectuant une régression linéaire, le coefficient directeur nous donne la valeur de la résistance : $R = 10.5 \pm 0.4 \text{ k}\Omega$.

1.2 Application : détecteur d'enveloppe ([Duffait, CAPES], p.157 ou [Duffait, Électronique], p.215)

La décharge d'un condensateur peut servir à fabriquer un détecteur d'enveloppe. On peut ainsi, en ajoutant une diode, effectuer une démodulation d'amplitude en choisissant correctement la fréquence caractéristique du circuit RC par rapport aux fréquences du signal et de la porteuse.



$$R = 10.0 \pm 0.1 \text{ k}\Omega$$

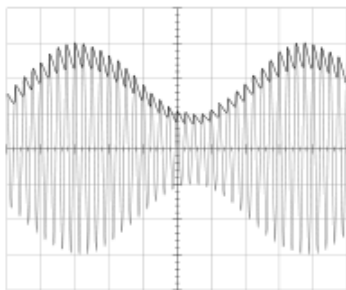
$$C = 4.7 \pm 0.1 \text{ nF}$$

$$f_{RC} \approx 20 \text{ kHz}$$

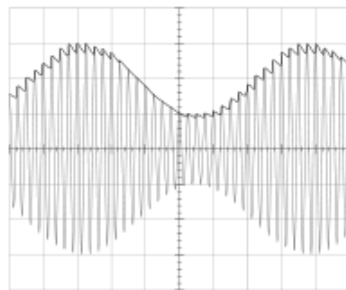
On utilise un GBF qui permet de faire de la modulation d'amplitude avec $f_{\text{porteuse}} = 100 \text{ kHz}$ et $f_{\text{signal}} = 1 \text{ kHz}$.

$$f_{\text{signal}} < f_{RC} < f_{\text{porteuse}}$$

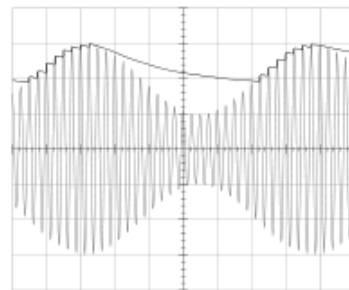
Le cas idéal est d'avoir une fréquence f_{RC} très faible devant f_{porteuse} et très grande devant f_{signal} (figure centrale), sinon le condensateur se décharge trop sur une période de la porteuse (figure de gauche), ou on décroche du signal (figure de droite). Le signal démodulé contient encore des hautes fréquences que l'on peut éliminer en ajoutant un filtre RC avec les mêmes valeurs pour R et C . Pour s'affranchir du seuil de la diode, on peut utiliser un montage avec un AO ([Duffait, CAPES], p.159).



τ_1 est légèrement supérieur à T_p



$T_p \ll \tau_1 < T_s$; le signal de sortie $U'(t)$ épouse de façon satisfaisante la forme de la partie supérieure de l'enveloppe.



$\tau_1 > T_s$

Il faut également veiller à ne pas choisir un taux de modulation trop élevé afin de ne pas tronquer le signal à cause de la tension seuil de la diode ($\approx 0.7 \text{ V}$).

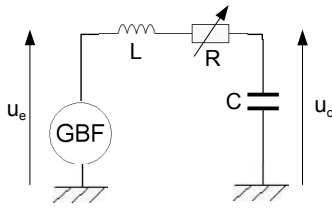
1.3 Circuit RLC ([Duffait, CAPES], p.74 ; [Donnini, Électricité] articles *Filtres et Régimes transitoires*)

Système du 2^e ordre :

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{LC} = \frac{u_e}{LC}$$

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du_c}{dt} + \omega_0^2 u_c = \omega_0^2 u_e$$

avec $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ et $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$



$$C = 10.0 \pm 0.1 \text{ nF}$$

$$L = 100 \pm 1 \text{ mH}$$

Suivant la valeur de Q , on a 3 régimes possibles. Ici, on utilise une résistance variable R pour observer les différents régimes et la résistance critique correspondant à $Q = 1/2$ vaut $R_c = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 6324 \Omega$.

– $Q < 1/2$ ou $R > R_c$: *régime apériodique*

$$u_c(t) = A \exp\left(\frac{\omega_0}{2Q}(-1 - \sqrt{1 - 4Q^2})t\right) + B \exp\left(\frac{\omega_0}{2Q}(-1 + \sqrt{1 - 4Q^2})t\right)$$

– $Q = 1/2$ ou $R = R_c$: *régime critique*

$$u_c(t) = (A + Bt) \exp(-\omega_0 t)$$

– $Q > 1/2$ ou $R < R_c$: *régime pseudo-périodique*

$$u_c(t) = \left[A \exp\left(-j\omega_0 t \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}\right) + B \exp\left(j\omega_0 t \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}\right) \right] \exp\left(-\frac{\omega_0 t}{2Q}\right)$$

On a 2 temps caractéristiques pour ce système : $T_1 = \frac{2Q}{\omega_0} = \frac{2L}{R}$ et $T_2 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$.

La pseudo-pulsation est $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$ et la pseudo-période est $T = \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$.

Comme pour le circuit RC , on utilise un signal créneau de basse fréquence afin de visualiser le régime transitoire du système à l'oscilloscope.

On fait varier la valeur de R afin de montrer les 3 régimes à l'oscilloscope. La détermination de R_c n'est pas aisée car il est difficile de déterminer avec précision pour quelle valeur de R , on passe du régime pseudo-périodique au régime apériodique. Il sera difficile de déterminer cette résistance à mieux que 200 ou 300 Ω dans cet exemple ([Duffait, CAPES], p.75).

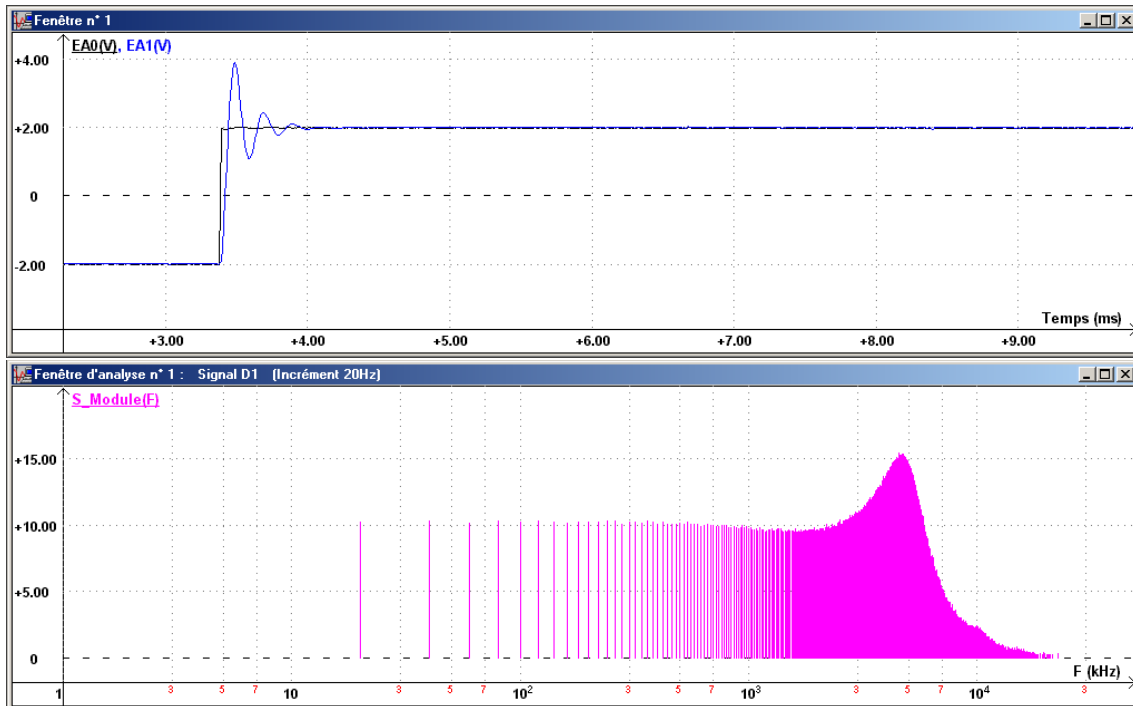
On choisit ensuite une valeur faible de R (par exemple 1000 la fréquence du régime pseudo-périodique vaut 4970 Hz) pour acquérir le régime pseudo-périodique avec Synchronie (cf. figure du haut ci-dessous). On enregistre la réponse indicielle du système. On choisit une faible fréquence pour le signal carré du GBF afin de bien observer la décroissance des oscillations du régime transitoire.

Soit $h(t)$ la réponse impulsionnelle de notre système. La fonction de transfert $H(j\omega)$ est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle.

La réponse à un créneau est : $s(t) = (h * \Theta)(t)$ où $*$ est le produit de convolution et $\Theta(t)$ la fonction de Heaviside. En dérivant ce signal, on obtient $s'(t) = (h * \Theta')(t) = (h * \delta)(t) = h(t)$ où δ est la distribution de Dirac. On retrouve donc la réponse impulsionnelle du système.

Finalement, en dérivant la réponse indicielle du système, on obtient la réponse impulsionnelle puis en prenant la transformée de Fourier, on obtient le module de la fonction de transfert (cf. figure du bas ci-dessous), c'est-à-dire le gain, en fonction de la fréquence. Ainsi le régime transitoire permet de caractériser le système².

On peut alors mesurer la fréquence du régime pseudo-périodique sur cette fonction de transfert.



La fréquence la plus faible accessible par cette méthode $f_{\min}$ est liée à la durée totale d'acquisition t_{ac} : $f_{\min} = 1/t_{ac}$. Deux limitations sont à prendre en compte pour la fréquence maximale accessible : tout d'abord, la durée d'échantillonnage Δt par la carte d'acquisition qui fixe une limite à $1/(2\Delta t)$; de plus, le signal créneau du générateur ne passe pas de $-E$ à $+E$ en un temps infiniment court.

²L'analyse effectuée est valable parce que l'on a un système linéaire.

1.4 Slew-rate de l'AO ([Duffait, Électronique], p.86, [Vauchelles], p.126)

Le slew rate (ou vitesse maximale de balayage) de l'AO correspond à la vitesse maximale de variation du signal de sortie de l'AO. Ainsi, si on applique un signal de forme sinusoïdale à l'entrée d'un montage inverseur (ou non inverseur) et que l'on augmente la fréquence, on observe à partir d'une certaine valeur que le signal de sortie se déforme pour devenir triangulaire³. On peut observer la transformée de Fourier du signal de sortie avec l'oscilloscope et observer l'apparition d'harmoniques lorsqu'on augmente la fréquence du signal d'entrée.

Si on applique un signal d'entrée de forme carrée, le signal est de forme trapézoïdale ou triangulaire suivant la fréquence du signal d'entrée. La valeur de la pente de ce signal de sortie est le slew-rate.

Le slew rate varie typiquement de quelques dixièmes à quelques $V.\mu s^{-1}$ selon les types d'AO.

Le slew rate traduit la charge à courant constant d'une capacité interne au circuit.

On a mesuré le slew rate à partir d'un montage inverseur mais les correcteurs ont fait remarquer que l'on pourrait également le mesurer avec un simple montage suiveur.

³La vitesse de balayage se fera d'autant plus sentir sur un signal sinusoïdal que l'amplitude de celui-ci est élevée car sa pente maximale sera plus élevée.

2 Régimes transitoires dans d'autres domaines de la physique

2.1 Photorésistance ([Sextant], p.70)

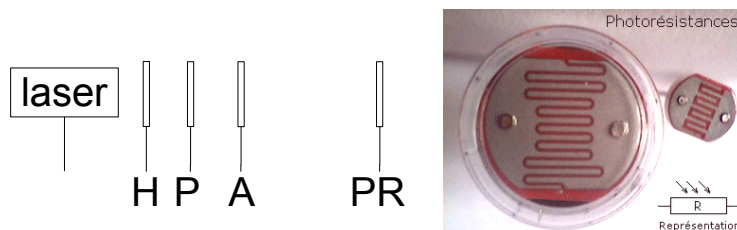
Une photorésistance est un composant dont la résistance diminue lorsque son éclairement augmente. Elle est constituée d'un matériau semi-conducteur (par exemple CdS, sensible dans le visible). Sous l'effet de la lumière, des paires électron-trou sont créées, augmentant ainsi la conductivité du matériau.

La résistance varie sur de nombreux ordres de grandeur en fonction de l'éclairement : elle peut aller de quelques $M\Omega$ dans l'obscurité à quelques centaines d' Ω pour un fort éclairement.

Les photorésistances sont utilisées dans des dispositifs d'allumage automatique de l'éclairage public en fonction de la luminosité.

On effectue le montage suivant : on utilise un laser et un hacheur optique afin de moduler la luminosité de la source qui va éclairer la photorésistance. On place ensuite un polariseur et un analyseur afin de pouvoir régler la luminosité du faisceau.

La photorésistance est insérée dans un circuit électronique alimenté sous 50 V avec une résistance de $10 M\Omega$ en série. On utilise une résistance importante (devant celle de la photorésistance ; on a au pire un facteur ≈ 10 quand la photorésistance est dans l'obscurité) afin de pouvoir considérer le courant dans le circuit constant. Ainsi, les variations de la tension aux bornes de la photorésistance observées à l'oscilloscope reflètent les variations de sa résistance.



En fort éclairement, on observe une dissymétrie entre le temps de montée (passage obscurité-lumière) et le temps de descente (passage lumière-obscurité). Le premier⁴ est de l'ordre de quelques ms alors que le second vaut plusieurs centaines de ms voire quelques s. Le temps de descente est liée au taux de recombinaison électron-trou. On peut également observer que ces temps dépendent de l'éclairement.

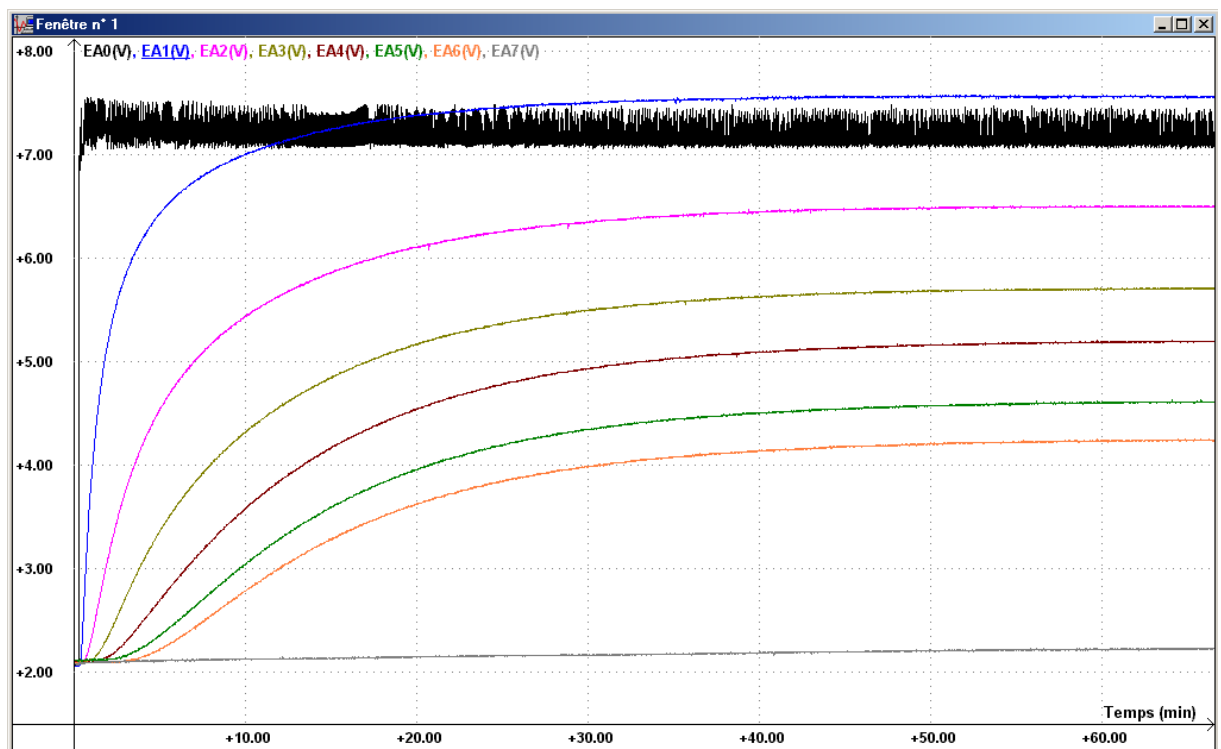
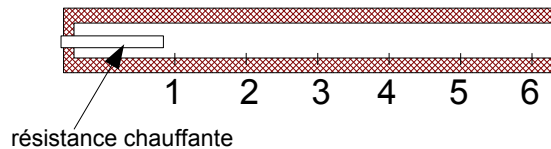
La photorésistance est un récepteur relativement lent que l'on évite d'employer dès que la fréquence du signal dépasse quelque kHz. Pour des applications à plus haute fréquence, on pourra utiliser des photodiodes dont le temps de réponse typique est de quelques dizaines de ns.

⁴Lors du passage obscurité-lumière, si l'on utilise une fréquence de l'ordre du Hz avec le hacheur optique, il faut être conscient que le temps mis pour découvrir le faisceau laser est de l'ordre de quelques ms. En effet, en estimant à 1 mm le diamètre du faisceau laser et la circonférence du cercle sur le disque du hacheur à 300 mm, on obtient un temps de l'ordre de 3 ms pour découvrir le faisceau laser ce qui est comparable avec le temps de montée mesuré.

2.2 Conduction thermique (notice de la manip, [Quaranta, Thermodynamique], article *Conduction thermique*)

Remarque : La résolution du problème du choc thermique pour une barre entièrement calorifugée est traitée dans le Diu de thermodynamique.

On effectue un choc thermique à une extrémité d'une barre de cuivre calorifugée sur sa surface latérale et en contact avec l'atmosphère à son autre extrémité.



On peut, grâce à cette expérience, remonter au coefficient de diffusion D du cuivre. L'équation de la chaleur s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Avec Synchronie, on peut dériver les différentes courbes pour obtenir $\frac{\partial T}{\partial t}$. L'opération dérivée augmente le bruit du signal, on se place donc au maximum de la courbe $\frac{\partial T}{\partial t}$ afin de diminuer au maximum l'incertitude sur cette valeur (celle-ci reste tout de même élevée, de l'ordre de 10 à 20 %). On peut également effectuer un lissage de la courbe avant la dérivation pour diminuer l'incertitude (on peut dans ce cas diminuer l'incertitude au-dessous de 10 %). L'échantillonnage ne doit pas être trop petit afin de ne pas rajouter de bruit (≥ 1 s). On a effectué une acquisition avec Synchronie pendant environ 1h avec un point toutes les secondes (on peut se contenter d'un point toutes les 5 s).

On repère le temps t_n correspondant à la valeur du maximum de la dérivée pour le capteur n ($n = 2, 3, 4$ ou 5) et la valeur de cette dérivée $\left. \frac{\partial T_n}{\partial t} \right|_{t=t_n}$. En effet, pour déterminer $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ numériquement, il faut 3 points. Pour le capteur n , on a : $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{n+1} - 2T_n + T_{n-1}}{\Delta x^2}$ où T_n est la température du n -ième capteur et Δx la distance entre 2 capteurs⁵. Et on mesure ensuite la température des capteurs $n - 1$, n et $n + 1$ à t_n et on obtient :

$$D = \frac{\left. \frac{\partial T_n}{\partial t} \right|_{t=t_n}}{\frac{T_{n+1} - 2T_n + T_{n-1}}{\Delta x^2}}$$

Les valeurs obtenues sont :

- * $1.03 \pm 0.14 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- * $1.03 \pm 0.10 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- * $1.06 \pm 0.15 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- * $0.96 \pm 0.20 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

La valeur tabulée du coefficient de diffusion thermique du cuivre est $D_{\text{Cu}} = 1.14 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dans le [Quaranta, Thermodynamique] et $D_{\text{Cu}} = 1.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dans le Diu de Thermodynamique. On retrouve bien l'ordre de grandeur. Les valeurs expérimentales sont cependant plus faibles que la valeur tabulée ; cela peut venir du calorifugeage non parfait du dispositif (pertes thermiques radiales⁶).

Conclusion

Les régimes transitoires se rencontrent dans tous les domaines de la physique : on en a vu des exemples en électronique, optique et diffusion thermique. Ces régimes nous renseignent sur le comportement du système (on a pu remonter à la fonction de transfert du RLC à partir de son régime transitoire). Ils peuvent être utilisés, par exemple, afin réaliser des traitements sur des signaux (détecteur d'enveloppe). Il interviennent également dans les limitations de certains composants (slew-rate de l'AO, temps de réponse de la photorésistance).

⁵ On a également une incertitude sur la dérivée seconde spatiale car les capteurs sont relativement espacés ($\Delta x = 10 \text{ cm}$) mais celle-ci est difficile à déterminer.

⁶ en régime permanent, on devrait avoir une droite dans le cas d'une isolation parfaite car $\Delta T = 0$ or on n'observe pas une droite en raison des pertes thermiques.

Remarques diverses

- il faut insister sur le fait qu'un système possède un temps caractéristique qui décrit son régime transitoire.
- autres exemples d'expériences : diffusion du glycérol dans l'eau, diapason.
- pour le circuit RC , aux faibles temps $\frac{du_c}{dt}$ est prépondérant $\rightarrow \frac{du_c}{dt} = \frac{u_e}{RC}$ d'où $u_c = \frac{u_e}{RC}t$: la croissance est linéaire aux faibles temps.
- on pourrait étudier un circuit RL comme système du 1^{er} ordre mais cela est moins facile car le choix de L est plus limité et de plus, la résistance de la bobine varie avec la fréquence.
- Parallèle système électronique/système mécanique⁷ :

Système électronique	Système mécanique
$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = u$	$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f$
charge (q)	position (x)
intensité ($i = dq/dt$)	vitesse ($v = dx/dt$)
inductance (L)	masse (m)
coefficient de résistance (c)	résistance (R)
(capacité) ⁻¹ (C^{-1})	rigidité (k)
$\omega_0^2 = 1/LC$	$\omega_0^2 = k/m$
$Q = \omega_0 m/c$	$Q = \omega_0 L/R$

- modèle d'évolution de porteurs pour la photorésistance : $\frac{dN}{dt} = \eta\phi - \alpha(NP - N_i^2)$ où η est le rendement quantique ($\eta = 1$ si chaque photon crée une paire électron-trou), ϕ est le flux lumineux incident (c'est-à-dire le nombre de photons arrivant par seconde).
- Rapport de jury de 2008 : Ce nouveau montage a été peu choisi cette année. Notons pourtant que les régimes transitoires interviennent dans de nombreux domaines de la physique et pas seulement en électricité !

Références

- [Duffait, CAPES] Expériences de Physique, CAPES de Sciences Physiques, Roger Duffait, Bréal
- [Duffait, Électronique] Expériences d'électronique, Agrégation de Sciences Physiques, Roger Duffait, Bréal
- [Vauchelles] Travaux pratiques d'électronique, Marguerite Vauchelles, Ellipses
- [Sextant] Optique expérimentale, Sextant, Hermann
- [Quaranta, Thermodynamique] Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique et applications, Jean-Marie Donnini, Lucien Quaranta, Pierron
- [Donnini, Électricité] Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité et applications, Jean-Marie Donnini, Pierron

⁷Un tableau de ce type peut être trouvé dans de nombreux ouvrages, notamment dans le Feynman, Mécanique 1, Chapitre 23, p.309